

# 无刷直流电机磁场定向控制系统研究

肖金凤, 喻金, 盛义发, 张垒  
(南华大学, 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**转矩脉动是无刷直流电机(BLDCM)目前存在的突出问题之一。这里阐述了 BLDCM 转矩脉动机理及抑制。仿照永磁同步电机磁场定向控制(FOC), 提出了采用 FOC 策略降低 BLDCM 转矩脉动, 给出了控制策略及实现方法, 并建立系统仿真模型, 仿真表明基于 FOC 的 BLDCM 控制系统性能良好, 转矩脉动小。以 STM32F103B 为核心设计了基于 FOC 策略的 BLDCM 控制系统试验平台, 基于 VB 设计了 BLDCM 上位机监控系统。实测的相电流为近似正弦波, 监控系统显示转速波动小, 电机运行平稳。

**关键词:**无刷直流电机; 转矩脉动; 磁场定向控制

**中图分类号:**TM33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-100X(2012)11-0103-03

## Study of Brushless Direct Current Motor Control System Based on Field Orientation Control

XIAO Jin-feng, YU Jin, SHENG Yi-fa, ZHANG Lei  
(University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:**The torque ripple is the most outstanding problem of brushless direct current motor(BLDCM), the torque ripple mechanism and reduction are introduced. Modelling permanent magnet synchronous motor field orientation control(FOC), the application of FOC strategy is put forward to reduce the torque ripple of BLDCM, the control strategy and implementation method are given, and the system simulation model is established, the simulation results show the introduced control performance of BLDCM based on FOC is good, and the torque ripple is small. STM32F103B is used as the control core to design the BLDCM control system test platform based on FOC. A BLDCM monitoring system based on VB is designed. The phase current curve is approximate sine wave, speed ripple is small, and the operation is stable.

**Keywords:**brushless direct current motor; torque ripple; field orientation control

**Foundation Project:**Supported by Hunan Natural Science Fund Program(No.12JJ6043); Hengyang Science and Technology Fund Program(No.2011KG63)

## 1 引言

转矩脉动问题是 BLDCM 存在的突出问题之一<sup>[1-2]</sup>。这里提出了一种新的无刷电机控制方法, 即 FOC, 为 BLDCM 的转矩脉动抑制提供了一个新思路。部分学者已将 FOC 策略应用于永磁同步电机, 使电机响应速度快、转矩波动小。少数文献也已提出将 FOC 策略应用于 BLDCM<sup>[3]</sup>, 但其实是将 BLDCM 与永磁同步电机概念混淆, 反电动势波形为正弦波的 BLDCM 才称作永磁同步电机, 文献只是将 FOC 策略应用于反电动势波形为正弦波的 BLDCM 控制系统中。与永磁同步电机不同, 目前还没有文献给出 BLDCM  $d, q$  坐标系下的等效

电路, 因此如何实现 BLDCM 的 FOC 以抑制转矩脉动具有深远的意义。

## 2 BLDCM 转矩脉动机理及抑制

BLDCM 产生转矩脉动的因素主要分为两类: ①与控制方法无关, 包括电机制造工艺及齿槽效应引起的转矩脉动; ②与控制方法相关。下面重点分析与控制方法有关的转矩脉动机理及抑制。

### 2.1 电枢反应引起的转矩脉动

对于电枢反应引起的转矩脉动, 现由文献[4]分析得出: 如转子磁路局部饱和, 在一个状态角内电枢反应对转子磁场的作用是先去磁后增磁, 并在增磁去磁过程中增磁不能抵偿去磁, 其表现为平均气隙磁通密度下降。

采用 FOC 使直轴电枢反应磁动势为零或很小, 将不存在增磁去磁, 可降低转矩脉动。

### 2.2 电流换相导致的转矩脉动

现有转矩脉动抑制方法或通过推迟关断相的

**基金项目:**湖南省自然科学基金项目(12JJ6043); 衡阳市科技基金项目(2011KG63)

**定稿日期:**2012-09-01

**作者简介:**肖金凤(1972-), 女, 湖南衡阳人, 硕士, 副教授, 研究方向为电机智能控制系统研究和电力电子装置。

关断,或选择适当的PWM方法如PWM-ON方式等,达到抑制转矩脉动的目的<sup>[9]</sup>。文献[6]提出了一种换相转矩自平衡控制方法,试图以两换相相反电动势的交点为换相点,并保证非换相相电流的稳定来维持转矩的恒定,由于此文献的分析前提是假定非换相相电流恒定,因而不能证明这种控制方式比传统控制方式有任何理论上的优势,且该方法算法较复杂,实际应用受限。

这里设计拟采用转子FOC,将不存在换相概念,也就没有转矩换相脉动。

### 2.3 电磁转矩产生的原理性波动

由前述分析可见,对于理想状态的BLDCM,如果不计换相转矩脉动,在一个状态角内的平均转矩几乎无转矩脉动。实际的大多数BLDCM,每相反电动势虽为梯形波,但梯形波的平顶宽度大多小于120°电角度,这种BLDCM采用方波控制时的相电流波形不再是方波电流。

实测了反电动势梯形波波形宽度为30°电角度的电机在方波控制下的相电流,结果显示出现有尖峰,且这个电流尖峰大小与反电动势的顶部波形有关。上述相电流波形的一个状态角内平均电磁转矩为:

$$T_{em} = P_e / \Omega = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \Omega \quad (1)$$

式中: $P_e$ 为电磁功率; $e_a, e_b, e_c$ 为定子反电动势; $i_a, i_b, i_c$ 为定子电流; $\Omega$ 为电机角速度。

由式(1)可见,要保持电磁转矩恒定,若不计电枢反应,只需 $e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$ 恒定。对上述有尖峰的相电流,还没有一种函数或近似方法来描述这种波形,文献[7]用方波函数代替这种波形来计算分析转矩和转矩脉动,显然是错误的,所以此文献得出的结果不正确,无参考价值。故这里提出采用FOC策略,以减小转矩脉动。

## 3 BLDCM 磁场定向控制分析及实现

由上述分析可知,BLDCM三相相电流计算复杂,暂时还不能给出 $d, q$ 坐标系下的等效电路,这是与永磁同步电机FOC的不同之处。当给定一个转矩时,相当于设定了三相定子相电流的幅值,此时通过检测到的转子电角度位置,就可计算出三相相电流的相位值。即只要跟踪控制各相相电流的设定值,就实现了BLDCM FOC的 $i_d=0$ 控制。电流的跟踪方式可采用PI跟踪或滞环跟踪,这里采用滞环跟踪。图1示出BLDCM FOC速度电流双闭环控制系统结构。在实际控制中并不需要进行Park变换与Clark变换,因为控制模式是 $i_d=0$ 控

制,在控制中只需将速度环ASR的误差输出作为三相相电流参考值计算器输入,根据转子位置角查正弦表,获得三相相电流参考值,再输入到电流滞环调节器,电流环调节器输出控制功率开关器件。对三相相电流滞环跟踪就完成了FOC过程。

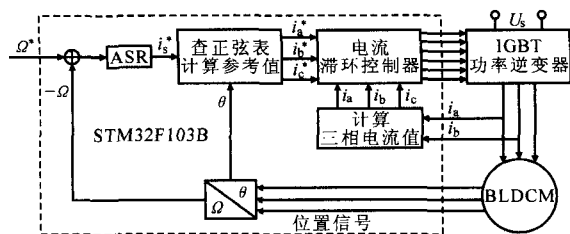


图1 BLDCM FOC 双闭环控制系统结构

Fig. 1 Structure of BLDCM FOC double closed-loop control system

## 4 BLDCM FOC 策略仿真研究

搭建了 $i_d=0$  BLDCM FOC 仿真系统进行FOC策略研究。因试验用电机的反电动势梯形波平顶宽度为30°电角度,现设定反电动势平顶宽度为30°电角度进行仿真。仿真电机参数如下:定子电阻2.875Ω,定子相电感1.5mH,电机负载3N·m,2对极。系统仿真波形如图2所示。

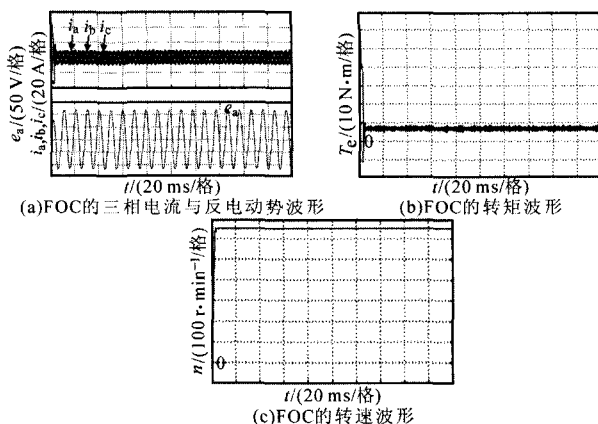


图2 仿真波形

Fig. 2 Simulation waveforms

由仿真波形可得:① $i_d=0$  FOC 转矩脉动小,且波动频率高,负载的惯性能过滤掉这些高频波动,因而 $i_d=0$  FOC 转速波动也小,仅为1 r·min<sup>-1</sup>,电机运行平稳;②提出的FOC能获得好的控制效果,转矩脉动小,运转平稳,为BLDCM的控制方法提供了新思路。

## 5 BLDCM 控制系统软硬件设计

### 5.1 硬件设计

以STM32F103B为核心,设计了BLDCM FOC系统应用平台。

图3示出基于FOC的系统硬件结构框图。

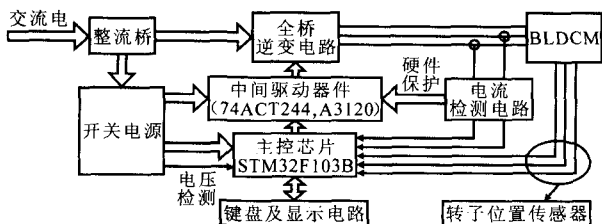


图3 BLDCM FOC系统硬件结构框图

Fig. 3 Block diagram of BLDCM FOC system hardware

选用 FGA25N120AN 型 IGBT 组建全桥逆变电路, FGA25N120AN 耐压 1.2 kV, 额定电流 25 A, 最大连续输出电流 50 A, 上升时间 50 ns。

## 5.2 软件设计

以 IAR 编译系统和 J-Link 仿真器为平台, 用 C 语言设计了 FOC 驱动软件, 利用 Windows 开发上位机电机监控界面。

### 5.2.1 主程序流程图

主程序流程图如图4所示。

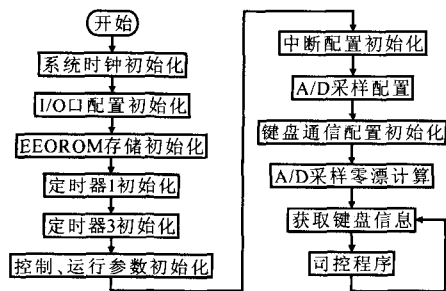


图4 主程序流程图

Fig. 4 Flowchart of main program

$i_d=0$  BLDCM FOC 启动时没有速度信息, 无法计算转子位置角度, 即无法输出合适的电压矢量, 所以设计时 FOC 中采用方波 PWM 控制方式来启动, 当电气角速度达到  $200 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 切换到 BLDCM FOC 模式。

### 5.2.2 基于VB的上位机监控程序设计

利用 VB 6.0 编程, 经界面设计和程序编写, 完成上位机监控系统设计。通过上位机监控界面, 用户能读取电机的状态信息(转速等), 也能完成电机参数设置等功能。图5示出上位机软件流程。

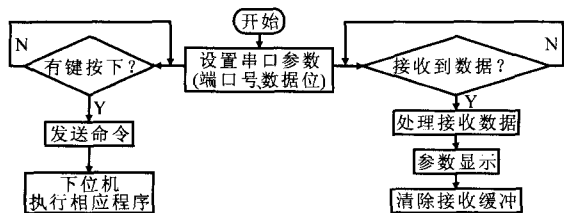


图5 BLDCM上位机软件流程图

Fig. 5 BLDCM flowchart of PC program

## 6 系统试验测试

试验电机参数: 额定电压 310 V, 额定电流 2.8 A, 定子电阻  $2.875 \Omega$ , 定子相电感 1.5 mH, 梯形反电动势平顶宽度约  $30^\circ$  电角度, 2 对极。试验波形如图6所示。

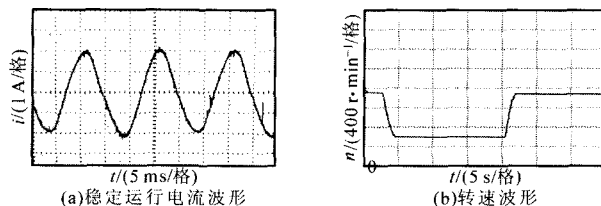


图6 试验波形

Fig. 6 Experimental waveforms

图6a为用TDS1012型示波器实测稳定运行于FOC方式下的BLDCM相电流, 其波形近似正弦波。设定电机转速由  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  变为  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 再变为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 上位机监控界面测得的转速曲线如图6b所示。可见, 转速脉动小, 电机运行平稳。

## 7 结论

转矩脉动是无刷直流电机存在的突出问题之一, 这里仿照永磁同步电机磁场定向控制, 提出采用磁场定向控制策略, 给出了实现方法, 仿真表明提出的基于磁场定向控制的无刷直流电机控制性能好, 转矩脉动小。设计了基于磁场定向控制的无刷直流电机控制系统, 实测的相电流为近似正弦波, 监控系统得到的电机转速脉动小, 运行平稳, 系统性能好。

## 参考文献

- [1] 陈基峰, 张晓峰, 王斯然, 等. 基于能量单元法的无刷直流电机导通区转矩脉动[J]. 电工技术学报, 2010, 32(11): 36-41.
- [2] 吴茂刚, 赵荣祥. 矢量控制永磁同步电动机的转矩脉动分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 11-14.
- [3] Vincent Onde. 利用 ARM7 处理器对无刷电机实施磁场定向控制[J]. 电子产品世界(嵌入式系统技术与应用专刊), 2006, 14(10): 48-52.
- [4] 张文娟, 李朗如. 一种外转子永磁无刷直流电机电枢反应的分析[J]. 微电机, 2004, 33(4): 9-12.
- [5] 王淑红, 熊光煜. 无刷直流电机换相转矩脉动减小及动态仿真[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(2): 169-173.
- [6] 陈冬, 房建成. 非理想梯形波反电动势永磁无刷直流电机换相转矩脉动抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(30): 79-83.
- [7] 李运德, 张森. 正弦波驱动无刷直流电机转矩脉动的研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(12): 79-81.